

УДК 621.362.2

Д. ф.-м. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ, В. Р. БИЛИНСКИЙ-СЛОТЫЛО

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины

E-mail: slotulo@mail.ru

ДВУХКАСКАДНЫЕ МОДУЛИ НА ОСНОВЕ Bi_2Te_3 И SiGe ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Спроектированы и исследованы каскадные модули для прямого преобразования в электрическую энергию отходов высокопотенциального тепла промышленного происхождения, двигателей внутреннего сгорания, а также тепла сгорания органического топлива. Определены тепловые и геометрические параметры ветвей в каскадных модулях на основе Bi_2Te_3 и SiGe . Описаны конструкции двухкаскадных модулей электрической мощностью 30 и 60 Вт, а также представлены результаты экспериментальных исследований их параметров.

Ключевые слова: термоэлектричество, термоэлемент, теория оптимального управления, каскадные термоэлектрические модули, коммутация.

В последнее время возрастает интерес к термоэлектрическому генерированию электрической энергии [1, 2], особенно от источников тепла с большой тепловой мощностью ($500\text{--}800^\circ\text{C}$), в связи с большим количеством таких источников. В первую очередь, это различные энергетические установки (двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины) и промышленное производство (сталелитейная промышленность, производство цемента, тепло сгорания органического топлива и др.).

Термоэлектрические модули для генераторов изготавливаются многими компаниями мира: Hi-Z Technology, Inc, Global Thermoelectrics, Биопос, Криотерм [3–5]. Это однокаскадные модули, работающие при относительно небольших перепадах температуры, и КПД их не превышает 5,8% [3, 6].

Вместе с тем, термогенераторы для указанных выше применений должны быть адаптированы для гораздо больших перепадов температур и в результате могут иметь более высокий КПД. Поэтому рациональным здесь видится использование каскадных модулей, изготовленных из разных материалов и оптимизированных на необходимые уровни рабочих температур.

Целью данной работы является исследование и разработка каскадных генераторных модулей, рассчитанных на уровень температур до 800°C , для расширения возможности практического использования термоэлектрических генераторов.

В настоящее время для широких практических применений преимущественно используются традиционные материалы Bi_2Te_3 , PbTe , SiGe ,

поскольку новых материалов с высоким КПД и пригодных для практического использования пока еще нет. Поэтому в качестве материалов для ветвей каскадов были выбраны Bi_2Te_3 и SiGe .

Проектирование двухкаскадного модуля проводилось с помощью методов теории оптимального управления, описанных в [7], при условии последовательного соединения холодного и горячего каскадов, а также электрической и тепловой согласованности каскадов. Задача оптимального управления состоит в определении оптимальных материалов, которые обеспечивают заданные значения электрической мощности каскадов, при которых достигается максимальная эффективность модуля.

В расчетах использовались экспериментально измеренные температурные зависимости термоэлектрических параметров α , σ , κ материалов n - и p - Bi_2Te_3 для холодного каскада [8], а также n - и p - SiGe — для горячего каскада [9].

Основные параметры разработанных двухкаскадных модулей электрической мощностью 30 Вт для температуры горячей стороны модуля $T_h = 800^\circ\text{C}$ и его холодной стороны $T_c = 50^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1.

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что выбором конструкции двухкаскадного модуля достигается различная сила тока и напряжения при одинаковой мощности (порядка 30 Вт) и эффективности (порядка 11,5%). При этом для создания двухкаскадного модуля мощностью 30 Вт на данный уровень рабочих температур предпочтение следует отдать конструкции модуля № 1. В этом случае количество материа-

Таблица 1

Расчетные параметры двухкаскадных генераторных модулей различных конструкций при $T_h = 800^\circ\text{C}$, $T_c = 50^\circ\text{C}$

Параметр	Значение параметра	
	Модуль № 1	Модуль № 2
Тип соединения ветвей холодного каскада	последовательно-параллельное	последовательно-параллельное
Тип соединения ветвей горячего каскада	последовательное	последовательно-параллельное
Размеры сечения ветвей холодного каскада, мм	4×4	4×4
Размеры сечения ветвей горячего каскада, мм	8×8	4×4
Высота ветви холодного каскада, мм	3	5,6
Высота ветви горячего каскада, мм	5,6	5,6
Количество пар ветвей холодного каскада	32	32
Количество пар ветвей горячего каскада	8	32
Электрическая мощность P , Вт	33	30
Напряжение на согласованной нагрузке U , В	1,26	2,2
Сила тока I , А	26,2	13,6
КПД η , %	11,5	11,7

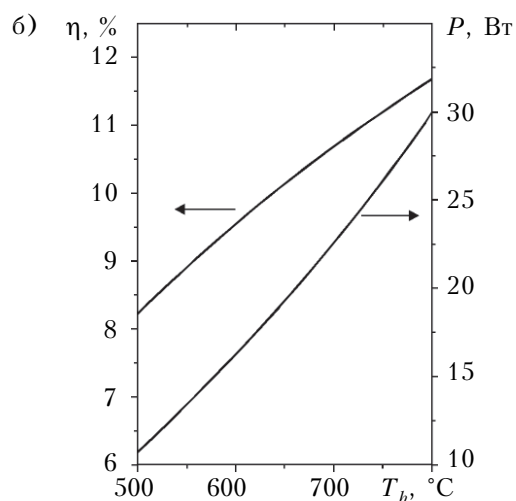
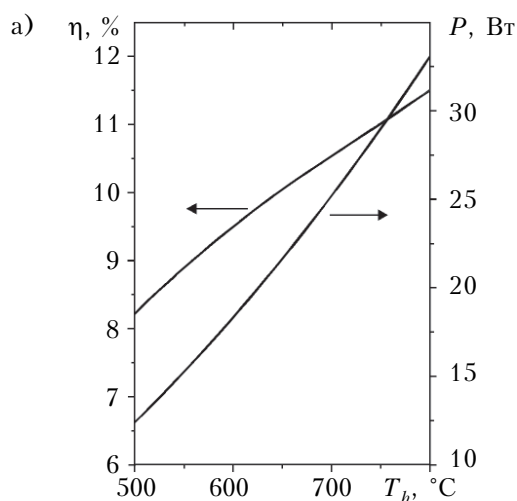


Рис. 1. Зависимости КПД и электрической мощности двухкаскадных модулей № 1 (а) и № 2 (б) от температуры горячей стороны при $T_c = 50^\circ\text{C}$

ла, необходимое для создания холодного каскада, в 1,85 раза меньше по сравнению с модулем № 2.

Зависимости эффективности и электрической мощности исследуемых двухкаскадных модулей от температуры горячей стороны приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, а, в диапазоне T_h от 700 до 800°C электрическая мощность растет от 25 до 33 Вт, КПД увеличивается от 10,5 до 11,5 %. При таких условиях межкаскадная температура модуля находится в пределах $285 - 255^\circ\text{C}$.

С использованием полученных результатов разработаны и оптимизированы конструкции двухкаскадных модулей электрической мощно-

стью 60 и 30 Вт для рабочих температур горячей стороны до 800°C .

Высокотемпературные каскады модулей изготовлены из материала SiGe, низкотемпературные — из материалов на основе Bi_2Te_3 . Каскады соединены последовательно. Холодная сторона низкотемпературного каскада изолирована керамикой Rubalit 7089, а горячая сторона высокотемпературного каскада — керамикой на основе оксида бериллия. Между горячим и холодным каскадами размещена медная теплопроводная пластина. Каскады размещены в герметичном корпусе из жаропрочной стали, объем которого заполнен инертным газом. Схема двухкаскадного модуля номинальной мощностью

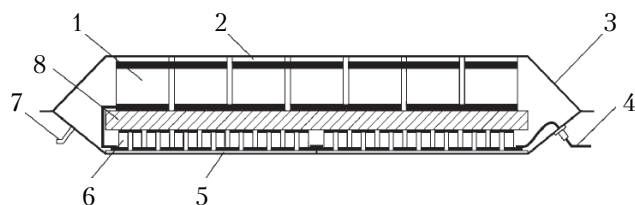


Рис. 2. Схема двухкаскадного модуля на уровень температур горячей стороны 750–800°C:

1, 6 — ветви высокотемпературного и низкотемпературного каскадов соответственно; 2, 5 — горячая и холодная керамика соответственно; 3 — герметичный корпус; 4 — электрический вывод; 7 — штенгель; 8 — теплопереход

60 Вт приведена на **рис. 2**. Габаритные размеры модуля составляют 106×106×20 мм. Результаты его экспериментальных исследований приведены на **рис. 3, а** и в **табл. 2**.

Как видно, в диапазоне температур горячей стороны 700–800°C электрическая мощность растет от 45 до 64 Вт, КПД увеличивается от 7,5 до 10,2%. При таких условиях межкаскадная температура модуля находится в пределах 270–290°C. Дальнейшее повышение температуры горячей стороны мало влияет на увеличение КПД модуля вследствие быстрого роста межкаскадной температуры. Это приводит к уменьшению перепада температур на горячем каскаде.

Результаты экспериментальных исследований параметров модуля электрической мощностью

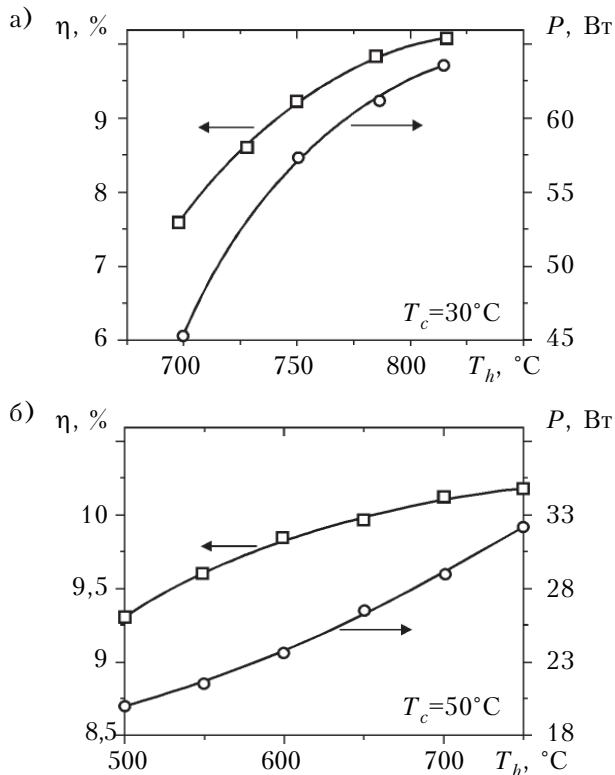


Рис. 3. Зависимости КПД и электрической мощности каскадных модулей номинальной мощностью 60 Вт (а) и 30 Вт (б) от температуры горячей стороны

Таблица 2

Параметры двухкаскадного генераторного модуля при $T_h = 800^\circ\text{C}$, $T_c = 30^\circ\text{C}$

Параметр	Значение параметра
Электрическая мощность на согласованной нагрузке, Вт	64,5
Напряжение на согласованной нагрузке, В	3,4
Сила тока, А	19
Тепловой поток на горячей стороне, Вт	633
КПД, %	10,2

30 Вт приведены на **рис. 3, б**. Его максимальная эффективность при $T_h = 750^\circ\text{C}$, $T_c = 50^\circ\text{C}$ составляет 10,1%, электрическая мощность 31 Вт, напряжение на согласованной нагрузке 2,2 В.

Таким образом, в процессе экспериментальных исследований показано, что оптимизация конструкции каскадных модулей из традиционных материалов на основе Bi_2Te_3 и SiGe позволяет обеспечить превращение тепловой энергии в интервале температур горячей стороны 750–800°C с эффективностью 9,5–10%. Учитывая, что технологии получения термоэлектрических материалов Bi_2Te_3 и SiGe , а также создание надежной коммутации ветвей из этих материалов хорошо отработаны, полученная величина эффективности позволяет надеяться на существенное расширение практического использования разработанных модулей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Анатычук Л.И., Михайловский В.Я. Развитие исследований и разработок термогенераторов на органическом топливе // Термоэлектричество. — 2004. — №4. — С. 5–36. [Anatyshuk L. I., Mikhailovskii V.YA. // Termoelektrichestvo. 2004. N 4. P. 5–36.]
- Михайловский В.Я. Физические модели термогенераторов на органическом топливе. Основные пути повышения их эффективности и расширения практического применения // Термоэлектричество. — 2005. — № 2. — С. 7–43. [Mikhailovskii V.YA. // Termoelektrichestvo. 2005. N 2. P. 7–43.]
- Pustovalov A.A., Gusev V.V., Nebera L.P. CATEG based power sources for autonomous automated systems and technical facilities controlling the state of gas mains and the work of gas wells // J. of Thermoelectricity. — 1998. — No.4. — P. 65–71.
- Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano / Edited by D.M. Rowe. — CRC Press, 2006.
- Kushch A.S., Bass J.C., Elsner N.B., Berestrand R.A. Thermoelectric development at Hi-Z technology // Proc. of the XX International Conference on Thermoelectrics. — Beijing (China). — 2001. — P. 422–430.
- Pustovalov A. A., Gusev V. V., Rubkin N. N. Catalytic thermoelectric generators operating on gas fuel // J. of Thermoelectricity. — 1994. — N 2. — P. 90–96.
- Анатычук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и прибо-

ров. — Черновцы: Прут, 1992. [Anatychuk L. I., Semenyuk V. A. Optimal'noe upravlenie svoystvami termoelektricheskikh materialov i priborov. Chernovtsy: Prut, 1992.]

8. Vikhor L. N., Anatychuk L. I. Generator modules of segmented thermoelements // Energy Conversion and Management. — 2009. — Vol. 50. — P. 2366—2372.

9. Анагычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. — Киев: Наукова думка, 1979. [Anatychuk L. I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Spravochnik. Kiev: Naukova dumka, 1979.]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 23.08 2012 г.*

Mikhailovsky V. Ya., Bilinskiy-Slotylo V. R. **Two-stage cascaded modules based on Bi_2Te_3 and SiGe for thermoelectric generators.**

Keywords: thermoelectricity, thermocouple, optimal control theory, the cascade thermoelectric modules, switching.

The results of the designing and investigation of cascading modules for direct conversion of high-grade waste heat into electrical energy are presented. The heat and geometrical parameters of cascade branches of the modules based on Bi_2Te_3 and SiGe are defined.

The paper presents design of two-stage modules with electric power 30 and 60 W, as well as experimental results on such modules.

Ukraine, Chernovtsy, Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine.

Михайловський В. Я., Білінський-Слотило В. Р. **Двокаскадні модулі на основі Bi_2Te_3 та SiGe для термоелектричних генераторів.**

Ключові слова: термоелектрика, термоелемент, теорія оптимального управління, каскадні термоелектричні модулі, комутація.

Спроековано та досліджено каскадні модулі для прямого перетворення в електричну енергію відходів високопотенційного тепла промислового походження, двигунів внутрішнього згоряння, а також тепла згоряння органічного палива. Визначено теплові та геометричні параметри гілок в каскадних модулях на основі Bi_2Te_3 та SiGe. Описано конструкції двокаскадних модулів електричною потужністю 30 та 60 Вт, а також представлено результати експериментальних досліджень їх параметрів.

Україна, м. Чернівці, Інститут термоелектрики НАН та МОН України.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Неволин В. К. Квантовый транспорт в устройствах электроники.— Москва: Техносфера, 2012.

Описываются квантовые свойства носителей тока, в том числе в устройствах электроники, в которых в большей мере доступно наблюдение квантовых явлений и в которых они могут быть существенными. Квантовый вклад в транспорт носителей тока рассматривается с помощью волн плотности вероятности. Такой подход позволяет более детально объяснить прежние эксперименты, а также предсказать новые эффекты, ряд из которых имеют экспериментальное подтверждение. А именно — устройство для поглощения тепла на основе квантового обмена энергиями носителей тока между электродами, методика экспериментального определения энергий Ферми материалов электродов и др. Книга предназначена для студентов, изучающих квантовую механику, для аспирантов и молодых научных сотрудников, изучавших ранее квантовую механику и работающих в области нанотехнологий и наноэлектроники, стремящихся открыть новые эффекты и создать уникальные устройства.

НОВЫЕ КНИГИ



Ащеулов А. А., Романюк И. С. Анизотропные оптикотермоэлементы на основе антимонида кадмия и их применение.— Черновцы: Золотые литавры, 2012.

В книге представлены результаты исследования термоэлектрических явлений в оптических прозрачных анизотропных средах, поперечная составляющая термоЭДС которых стала основой для создания ряда оригинальных термоэлементов. Это позволило предложить новый метод регистрации лучистых потоков, названный методом «прозрачной стенки», разработать соответствующие технологии и материалы на основе антимонида кадмия и реализовать новое поколение различных приборов и устройств. Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников в области термоэлектрического приборостроения, а также будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.